

Вестник научно-технического развития

Bulletin of Science and Technical Development

Номер 11 (159), 2020 г.

DOI: 10.18411/vntr2020-159



Издается с 2007 года

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

*Журнал выпускается под научным руководством Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН*

ОГЛАВЛЕНИЕ № 11 (159), 2020

Степан Павлович Радзевич. О приоритете М.Л. Новикова в разработке «зацепления Новикова».....**стр. 3 - 20**

Сергей Константинович Цветаев. О возбуждении пьезоэлектрических стержневых колебательных систем с переменной добротностью.....**стр. 21 – 28**

*Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.*



ISSN 2070-6847

УДК 621.833

О ПРИОРИТЕТЕ М.Л. НОВИКОВА В РАЗРАБОТКЕ “зацепления Новикова”

© Степан Павлович Радзевич
EATON Corp., Detroit, USA
radzevich@usa.com

Аннотация. В статье изложена точка зрения автора о роли и вкладе М.Л. Новикова в разработку нового вида зубчатых зацеплений, впоследствии получившего название “зацепление Новикова”. Приведены краткие биографические сведения о М.Л. Новикове и о Э. Вильдгабере, которого часто и незаслуженно называют со-разработчиком зацепления Новикова. Проанализирована геометрия и кинематика зацепления Новикова и показано принципиальное его отличие от ранее предложенного Вильдгабером зацепления с круговым профилем зубьев. При написании статьи преследовалась цель привлечь внимание заинтересованного читателя к вопросу о приоритете М.Л. Новикова в разработке нового вида зубчатых зацеплений. Для этого кратко анализируется ситуация, сложившаяся вокруг зацепления Новикова более чем через 60 лет после его изобретения. Кратко намечены возможные пути совершенствования зацепления Новикова.

Обсуждение вопроса о приоритете М.Л. Новикова в разработке нового вида зубчатых зацеплений в настоящее время приобретает особый смысл в связи с приближающимся 110-летием (в 2025 году) со дня рождения изобретателя и ученого.

Ключевые слова: зубчатое колесо, зубчатая передача, профиль зуба, коэффициент перекнытия, Новиков, Вильдгабер.

ABOUT THE PRIORITY OF M.L. NOVIKOV IN THE DEVELOPMENT OF "Novikov Gearing"

© Stephen P. Radzevich
EATON Corp., Detroit, USA
radzevich@usa.com

Abstract: The author's position on the role and contribution of M.L. Novikov in the development of a new type of gearing is described in the article. Later called gearing of this kind was called “Novikov's gearing”. Brief biographical sketches about M.L. Novikov and E. Wildhaber. The latter is often and undeservedly called the co-developer of the Novikov gearing. The geometry and kinematics of Novikov's gearing are analyzed and its fundamental difference from the gearing with a circular tooth profile earlier proposed by Wildhaber is shown. When writing the article, the goal was to draw the attention of an interested reader to the issue of priority of M.L. Novikov in the development of a new type of gearing. For this, we briefly analyze the situation around the Novikov gearing more than 60 years after it was invented. Possible ways to improve the Novikov gearing are briefly outlined.

Discussion of the issue of priority by M.L. Novikov in the development of a new type of gearing is currently acquiring special meaning in connection with the approaching 100th anniversary (in the year of 2025) of the birth of the inventor and scientist.

Key words: gear, gearing, tooth profile, contact ratio, Novikov, Wildhaber.

Зацепление Новикова давно и прочно вошло в практику машиностроения. Оно хорошо зарекомендовало себя в случаях, когда для передачи вращения используются относительно мягкие зубчатые колеса с твердостью рабочих поверхностей зубье до *HB 350*. Не так хорошо обстоят дела с применением передач *Новикова* высокотвердыми зубчатыми колесами.

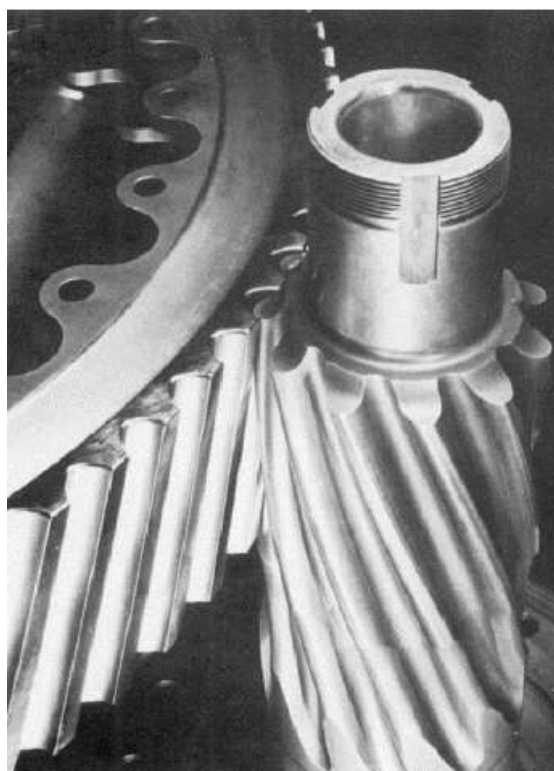


Рис. 1. Использование зацепления *Новикова* в конструкции трансмиссии вертолета (Westland Helicopters, Ltd.).

Имеющиеся трудности с применением передач *Новикова* более твердыми колесами являются следствием как недостаточно глубоко понятой сущности этого вида передач, так и недопустимо низкой технологией изготовления зубчатых колес. Пример успешного использования *зубчатой передачи Новикова* в конструкции трансмиссии вертолета компании Westland Helicopters, Ltd. показан на рис. 1.

Сложилось так, что разработанный *М.Л. Новиковым* новый вид зубчатых зацеплений часто называют зацеплением *Вильдгабера-Новикова* (*Wildhaber-Novikov gearing* или *W-N gearing*), что неправомерно. Автор придерживается точки зрения, что название “зацепление *Вильдгабера-Новикова*” некорректно. *Зацепление Новикова* – единственно правильное название для этого вида зубчатых зацеплений. Ниже эта точка зрения обосновывается как на основе материалов, опубликованных в открытой печати, так и на основе материалов,

ставших известными автору из бесед со специалистами, лично знавшими *М.Л. Новикова* и *Е. Wildhaber*.

Зацепление *Новикова*. Этот вид зубчатых зацеплений разработан *М.Л. Новиковым* и систематизированно изложен в его докторской диссертации [1]. Как указывал автор, предложенный им вид зацеплений может быть использован для проектирования зубчатых передач “с параллельными, пересекающимися и перекрещивающимися осями, с внешним и внутренним зацеплением, с постоянным и переменным передаточным числом, ...” [2].

Обсуждение *зацепления Новикова* уместно начать с краткой биографической справки изобретателя, тем более, что очень скоро исполняется его 110-летний юбилей.

Штрихи к биографии *М.Л. Новикова*. О Михаиле Леонтьевиче Новикове, полковнике-инженере, докторе технических наук, профессоре, бывшем заведующем кафедрой ВВИА им. Н.Е. Жуковского, лауреате Ленинской премии (1959) большинству читателей известно мало. Поэтому краткое изложение доступных фактов из его биографии представляет интерес, особенно для начинающих свой путь в науке.

Михаил Леонтьевич Новиков родился 25 марта 1915 года в городе Иваново в рабочей семье [3]. Работать начал учеником слесаря в возрасте 15 лет. В 1934 году *М.Л. Новиков* поступает на первый курс МВТУ им. Н.Э. Баумана. По окончании второго курса МВТУ он был зачислен слушателем Военно-Воздушной Инженерной Академии имени профессора Н.Е. Жуковского, после окончания которой (в 1940 году) оставлен работать на одной из ведущих специальных кафедр. За короткий срок *М.Л. Новиков* прошел путь от младшего преподавателя до начальника этой кафедры.



Михаил Леонтьевич Новиков (1915-1957)

Наряду с положенной по должности учебно-методической работой, Михаил Леонтьевич занимался научными исследованиями и изобретательством. Им было сделано более десяти изобретений, имеющих важное значение для развития авиационной техники.

Много внимания *М.Л. Новиков* уделял проблеме увеличения несущей способности зубчатых передач. Эта тематика исследовательских работ имела большое значение как для авиадвигателестроения, так и для машиностроения в целом. Результатом многолетнего упорного труда в этом направлении явилась разработка *М.Л. Новиковым* нового вида

зубчатых зацеплений. Разработанный вид зубчатых зацеплений защищен автоским свидетельством [2].

За разработку нового вида зубчатых зацеплений *М.Л. Новиков* был удостоен Ленинской премии.

Несмотря на громкую славу и широкую известность, *М.Л. Новиков* оставался скромным человеком. Вот пример из воспоминаний, которыми с автором поделился *А.С. Яковлев*, (г. Орел), лично знавший *М.Л. Новикова*¹: “*Михаил Леонтьевич был одержимым, беспредельно преданным науке, и прежде всего скромным, благородным и внимательным человеком и объективным собеседником, без тени чванства и амбиций. Приведу характерные примеры. Приехав первый раз в ВВИА, я привез два варианта заводской передачи с зацеплением Новикова, причем один из вариантов был ДЛЗ (отсутствовавший в его диссертации). На зубчатых колесах обоих вариантов мною были посчитаны общие нормали, увидев которые Михаил Леонтьевич сказал, что в его зацеплении общая нормаль отсутствует. Я стоял на своем и доказывал существование нормали. Присутствовавшие при этом его помощники дружно и шумно принялись доказывать отсутствие нормали.*

Михаил Леонтьевич же спокойно сказал мне “Ну, хорошо, доказывайте”. После непродолжительной дискуссии Михаил Леонтьевич задумался, призвал аудиторию к тишине и сказал: “Он прав, общая нормаль существует”. Сказал спокойно, и все согласились.

И еще. Во время одной из наших бесед к нему подошла секретарь и сказала, что его срочно вызывает генерал-лейтенант, начальник Академии. Михаил Леонтьевич сказал мне: “Извините Анатолий Сергеевич, я постараюсь освободиться как можно скорее” и, обращаясь к помощникам: “Роман Васильевич, Виктор Алексеевич, займите, пожалуйста, Анатолия Сергеевича”. Он, в то время начальник кафедры, полковник ВВИА, доктор технических наук, профессор, а я-то всего молодой задиристый инженер! Много Вы встречали руководителей, так обходящихся с собеседниками, стоящими на столько рангов ниже?”.

Новиков М.Л. скоропостижно скончался 19 августа 1957 года, в возрасте всего лишь 42 двух лет².

Кинематика и геометрия зацепления *Новикова*. Концепция и теория нового вида зацеплений изложена *М.Л. Новиковым* в его докторской диссертации [1] и защищена авторским свидетельством СССР [2]. По материалам диссертации впоследствии опубликована монография [3] (уже без непосредственного участия *М.Л. Новикова*).

Выданное на зацепление *Новикова* авторское свидетельство СССР [2] иллюстрируется схемой контакта выпуклого профиля зуба шестерни с вогнутым профилем зуба зубчатого колеса (рис. 2).

¹ См., также, сообщение №373 на форуме журнала “Редукторы и приводы”, www.reducer-news.ru/forum/index.php?fid=1.

² Яковлев, А.С.: “Чрезмерные нагрузки резко подорвали здоровье Михаила Леонтьевича, что выразилось в нервном истощении и потере сна. Госпитализация и лечение электросном желаемого результата не дали и по рекомендации врачей он поехал отдыхать к родственникам в село, где-то под Киевом. По утрам гулял в окрестностях, купался в небольшой речушке. В один из дней он долго не возвращался к завтраку... . Его обнаружили утонувшим в мелкой речушке (глубина, как говорили, по колено)... Как это произошло, неизвестно... Возможно сердечный приступ, возможно еще что... . Ведь у нас в то время если бы это был хотя бы секретарь райкома, а не какой-то там ученый, то он гулял бы под присмотром врачей и охраны...” [e-mail от А.С. Яковлева (info@spingear.ru, www.spingear.ru) от 12 марта 2009 г.].

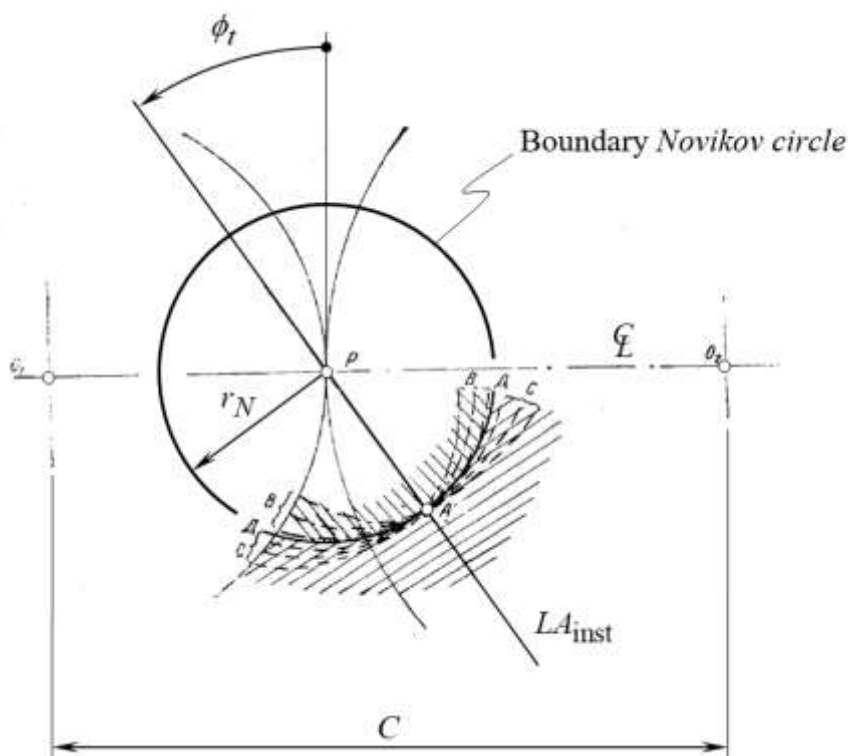


Рис. 2. Концепция зацепления Новикова [а.с. No. 109,113, 1956 (СССР); понятие “граничная N – окружность” радиуса r_N ввел в рассмотрение С.П. Радзевич, ~2008].

По тексту описания изобретения дано следующее пояснение: “Сущность изобретения заключается в следующем.

В пространстве, в котором зафиксированы оси вращения зубчатых колес, задается линия зацепления в виде прямой или плавной кривой, проходящей в непосредственной близости от мгновенной оси относительного вращения-скольжения. Вдоль линии зацепления назначается движение точки зацепления с постоянной или плавно изменяющейся скоростью. Движущаяся точка зацепления описывает в пространствах, связанных с вращающимися зубчатыми колесами, контактные линии. Через эти линии можно провести ряд некоторых поверхностей, которые могут быть сопряженными рабочими поверхностями зубцов, если они будут иметь общую нормаль в каждом текущем положении точки зацепления и будет удовлетворяться основная теорема зацепления, если кривизны поверхностей будут удовлетворять заданному передаточному отношению и если, наконец, будет отсутствовать взаимное пересечение поверхностей в пределах их рабочих участков.

Предлагаемые виды рабочих поверхностей зубцов удовлетворяют поставленным условиям и обеспечивают высокую контактную прочность зубцов.

В плоскостях, перпендикулярных мгновенной оси относительного вращения-скольжения и проходящих через текущее положение точки зацепления, проводятся дуги окружностей из центров, находящихся на прямой, проходящей через точку зацепления и мгновенную ось, и в непосредственной близости от этой оси. Дуги окружностей можно считать профилями зубцов.

Непрерывная совокупность профилей для всех текущих положений точки зацепления образует сопряженные поверхности зубцов, при этом рабочая поверхность для одного из колес будет выпуклой, а для другого – вогнутой (по направлению, перпендикулярному к

мгновенной оси). В частном случае радиусы профилей зубцов могут быть одинаковыми по величине и равными расстоянию от точки зацепления до мгновенной оси

При конструировании зубцов следует отдавать предпочтение точечному зацеплению с малой разницей в величинах радиусов профилей

Профили зубцов могут иметь форму, отличающуюся от дуги окружности, однако кривые профилей другой формы (проходя через точку зацепления) должны находиться внутри упомянутого кругового профиля с центром в точке, находящейся на мгновенной оси (должны уходить в “тело” зубцов).

Закон движения точки зацепления (т.е. скорость и траектория ее движения) выбираются так, чтобы потери на трение и износ были незначительными. Потери на трение и износ пропорциональны относительной скорости скольжения в зацеплении, следовательно необходимо стремиться к уменьшению последней, а для этого линию зацепления не следует значительно удалять от мгновенной оси. Однако чрезмерное приближение линии зацепления к мгновенной оси нецелесообразно, так как связано с уменьшением контактной прочности.

... Ширина обода зубчатых колес или длина зубцов должна находиться в таком соотношении с шагом их, при котором обеспечивался бы заданный коэффициент перекрытия при пересопряжении пар зубцов. Зубчатые передачи могут иметь одноточечное зацепление, т.е. в работе может участвовать только одна пара зубцов (за исключением периода пересопряжения), и могут быть передачи с многоточечным зацеплением, когда в одновременной работе находится несколько пар зубцов.

В случа зубчатых передач с параллельными осями удобнее всего, исходя из конструктивных и технологических соображений, выбрать линию зацепления в виде прямой, параллельной осям колес, а скорость движения точки зацепления принять постоянной. При этом радиусы профилей зубцов во всех плоскостях, перпендикулярных осям, будут одинаковы, рабочие поверхности зубцов будут представлять собой правильные винтовые поверхности”.

Описание изобретения [2] составлено далеко не лучшим образом, равно как и схема, иллюстрирующая концепцию зацепления Новикова. Следовало-бы более четко акцентировать внимание на следующих принципиальных отличиях, свойственных зацеплению Новикова (на примере зубчатой передачи с параллельными осями):

(а) через полюс зацепления P проходит прямая, составляющая с межосевым перпендикуляром O_1O_2 торцовый угол зацепления α_t ;

(b) на некотором расстоянии от полюса зацепления P на прямой выбирается точка A ,

(с) через точку A параллельно осям O_1 и O_2 (и, следовательно, перпендикулярно плоскости чертежа рис. 2) проходит прямая линия – линия зацепления³,

(d) через точку A проводится дуга некоторой плавной кривой так, чтобы центр кривизны этой кривой в точке A располагался на прямой PA ,

(е) через точку A проводится дуга некоторой другой плавной кривой так, чтобы центр кривизны этой кривой в точке A также располагался на прямой PA ,

(f) построенные дуги используются в качестве профилей зубьев шестерни и зубчатого колеса (для этого кривизны дуг должны исключать возможность интерференции зубьев как в дифференциальной окрестности точки A , так и в пределах всей высоты зубьев шестерни и колеса),

³ Автором данной статьи позже было показано [14], что это не линия зацепления, как на то указано в описании изобретения, а псевдо-линия зацепления. Фактическая линия зацепления расположена в плоскости чертежа рис. 2 и имеет нулевую длину.

(g) при передаче вращения контактная точка A перемещается вдоль линии зацепления с постоянной скоростью, при этом проекция точки A в торцевой плоскости своего положения не изменяет,

(h) коэффициент перекрытия m_t зубчатой передачи *Новикова* равен ее коэффициенту осевого перекрытия m_F , т.е. имеет место соотношение $m_t = m_F$, тогда как коэффициент торцового перекрытия m_p равен нулю ($m_p = 0$) [поскольку имеет место равенство $m_t = m_p + m_F$, то при $m_p = 0$ это равенство упрощается к виду $m_t = m_F$].

Равенство нулю составляющей $m_p = 0$ является принципиальным для зацепления *Новикова*.

Если допустить, что $m_p \neq 0$, это на корню убивает концепцию разработанного *М.Л. Новиковым* зубчатого зацепления.

Показанная на рис. 3 схема (см. фиг. 62 на стр. 146 в [3]) дает более полное (по сравнению с рис. 2) представление о предложенной *М.Л. Новиковым* концепции нового вида зубчатых зацеплений.

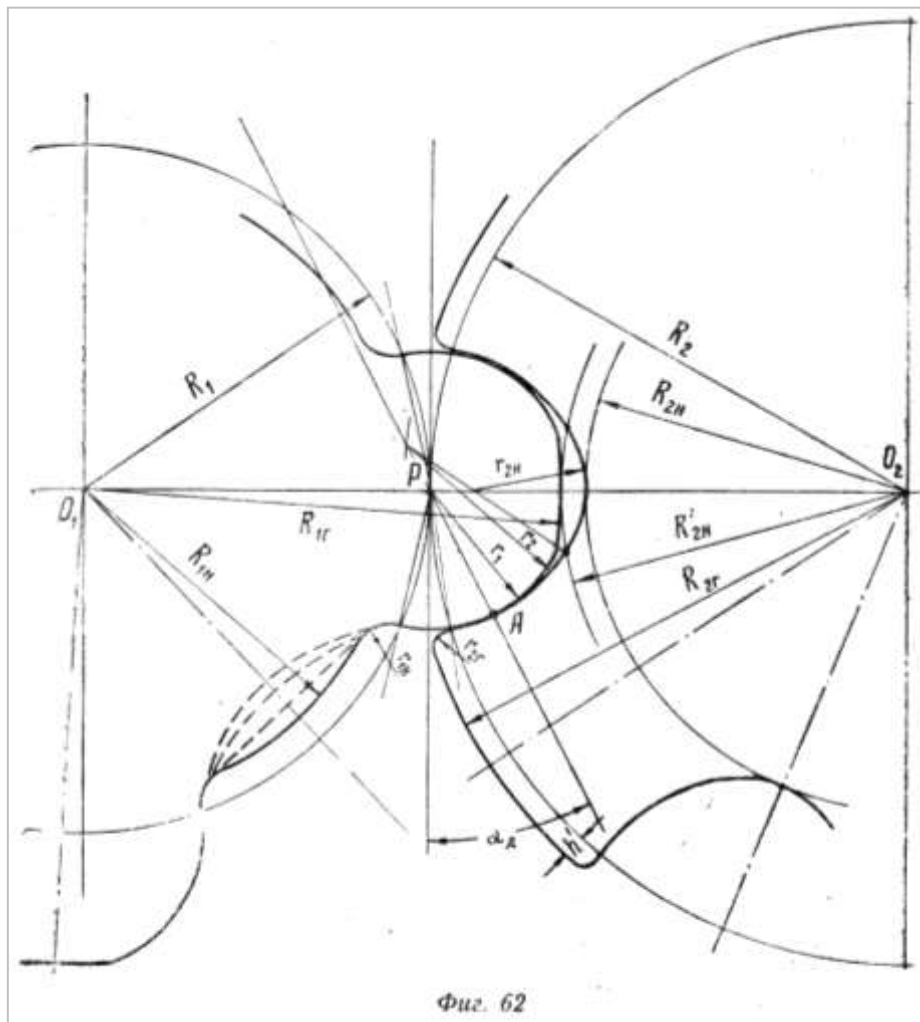


Рис. 3. Иллюстрация (Фиг. 62, стр. 146 в [3]), поясняющая концепцию зацепления *Новикова*.

Зубчатая передача Э. Вильдгабера. Эрнст Вильдгабер работал над проблемой повышения несущей способности зубчатых передач. Он обратил внимание на то, что в хорошо известных и широко применяемых эвольвентных зубчатых передачах контактирующие зубья колес имеют выпуклые профили. Такой контакт приводит к высоким контактным напряжениям, что ограничивает плотность мощности, передаваемой зубчатой передачей. Естественным было стремление заменить контакт двух выпуклых профилей контактом профилей, один из которых выпуклый, а другой – вогнутый. В конечном итоге это привело Э. Вильдгабера к изобретению нового вида зубчатых передач с круговым профилем зубьев⁴.



Эрнст Вильдгабер
(Ernest Wildhaber)
(1893-1979)

Штрихи к биографии Э. Вильдгабера. Сведения, которыми располагает автор о д-ре Эрнсте Вильдгабере (Ernest Wildhaber), крайне скудны. Известно, что родился он в 1893 году в Швейцарии. В 1919 году закончил Высшую техническую школу университета г. Цюрих (Technische Hochschule of Zurich University). В 1924 году он начал работать в фирме Глисон (The Gleason Works, Rochester, NY). Многие (включая автора настоящей статьи) относят Э. Вильдгабера к числу наиболее плодотворных специалистов, когда-либо работавших в области проектирования зубчатых передач и изготовления зубчатых колес. В общей сложности на имя Э. Вильдгабера выдано 279 патентов на изобретения, связанные с проектированием и изготовлением зубчатых колес (общее количество патентов, выданных на

⁴ Автором данной статьи строго доказано, что предложенная Э. Вильдгабером зубчатая передача неработоспособна в принципе. Очень может быть, что это понимал и сам изобретатель. Косвенным подтверждением тому служит следующее.

Предположим, что Э. Вильдгаберу, который понимал важность своего изобретения, удалось (как он это утверждает [5]) изготовить работоспособную зубчатую передачу, составленную из колес с круговым профилем зубьев. Будучи талантливым и продвинутым инженером, почему не довел изобретение до практического использования? У него не было для этого возможностей? Нет, они у него были, что убедительно подтверждено успешным внедрением других, менее обещающих, его изобретений. Автор данной статьи придерживается точки зрения, что та единственная зубчатая пара, которая была изготовлена Э. Вильдгабером, оказалась неработоспособной, что и охладило азарт изобретателя. В противном случае, где же он был все это время (с 1926 до конца 1950-х года и начала 1960-х)? Почему в течение почти 30 лет не поднимал вопрос о своем приоритете в разработке нового вида зацеплений?

на имя Э. Вильдгабера, превышает 320). Предложенная им конструкция гипоидной передачи, так же как и метод нарезания прямозубых конических колес, известны практически всем инженерам и исследователям, работающим в области зубчатых передач.

Э. Вильдгабер также является автором серии интересных теоретических работ, опубликованных в 1945-46 годах⁵ в журнале *American Machinist*.

Кинематика и геометрия передачи колесами с круговым профилем зубьев, предложенной Э. Вильдгабером. Зубчатая передача с параллельными осями, на которую Э. Вильдгаберу выдан патент США [4] (см. рис. 4), составлена из колес с круговым профилем зубьев. В данной статье нет необходимости рассматривать во всех деталях зубчатую передачу Э. Вильдгабера. Остановимся только на тех особенностях этой зубчатой передачи, которые имеют отношение к зацеплению Новикова.

Во-первых, в самом конце первой страницы описания изобретения Э. Вильдгабер указывает, что: “*In gearing according to my invention, the contact point between two normal profiles passes over the whole active profile during a turning angle, which corresponds to less than one half the normal pitch, and usually to much less than that*”. Смысл этого утверждения Э. Вильдгабера состоит в том, что в процессе зацепления точка контакта пробегает всю высоту активного профиля зубьев. Это подтверждается анализом рис. 4, где показано, что точка контакта в процессе зацепления перемещается из положения 11 в положение 11'. Эта особенность зубчатой передачи Э. Вильдгабера многократно повторяется в описании изобретения [4] и особо отражена в формуле изобретения. Таким образом, следует заключить, что коэффициент m_p торцового перекрытия зубьев в зубчатой передаче Э. Вильдгабера больше нуля ($m_p > 0$).

⁵ Во время одного из посещений фирмы Глисон автору рассказали любопытную историю. Примерно в 1945-46 годах у Э. Вильдгабера сложились непростые отношения с руководством фирмы *The Gleason Works*, и ему пришлось на время оставить работу в этой компании. Появившееся свободное время надо было чем-то занять. Именно тогда были написаны и опубликованы его теоретические работы, выходявшие с интервалом примерно в один месяц.

Здесь не лишне будет обратить внимание также на следующий небезынтересный факт. В СССР к теоретическим работам Э. Вильдгабера был проявлен значительный интерес. Его статьи (1945-46) были переведены с английского на русский, после чего были изданы отдельной книгой: Вильдгабер Э., *Основы зацепления конических и гипоидных передач*. Пер. с англ. и комментарии А.В. Слепака. – М.: Машгиз, 1948. –176с. На английском языке такая книга никогда не издавалась.

Oct. 5, 1926.

1,601,750

E. WILDHABER

HELICAL GEARING

Filed Nov. 2, 1923

2 Sheets-Sheet 1

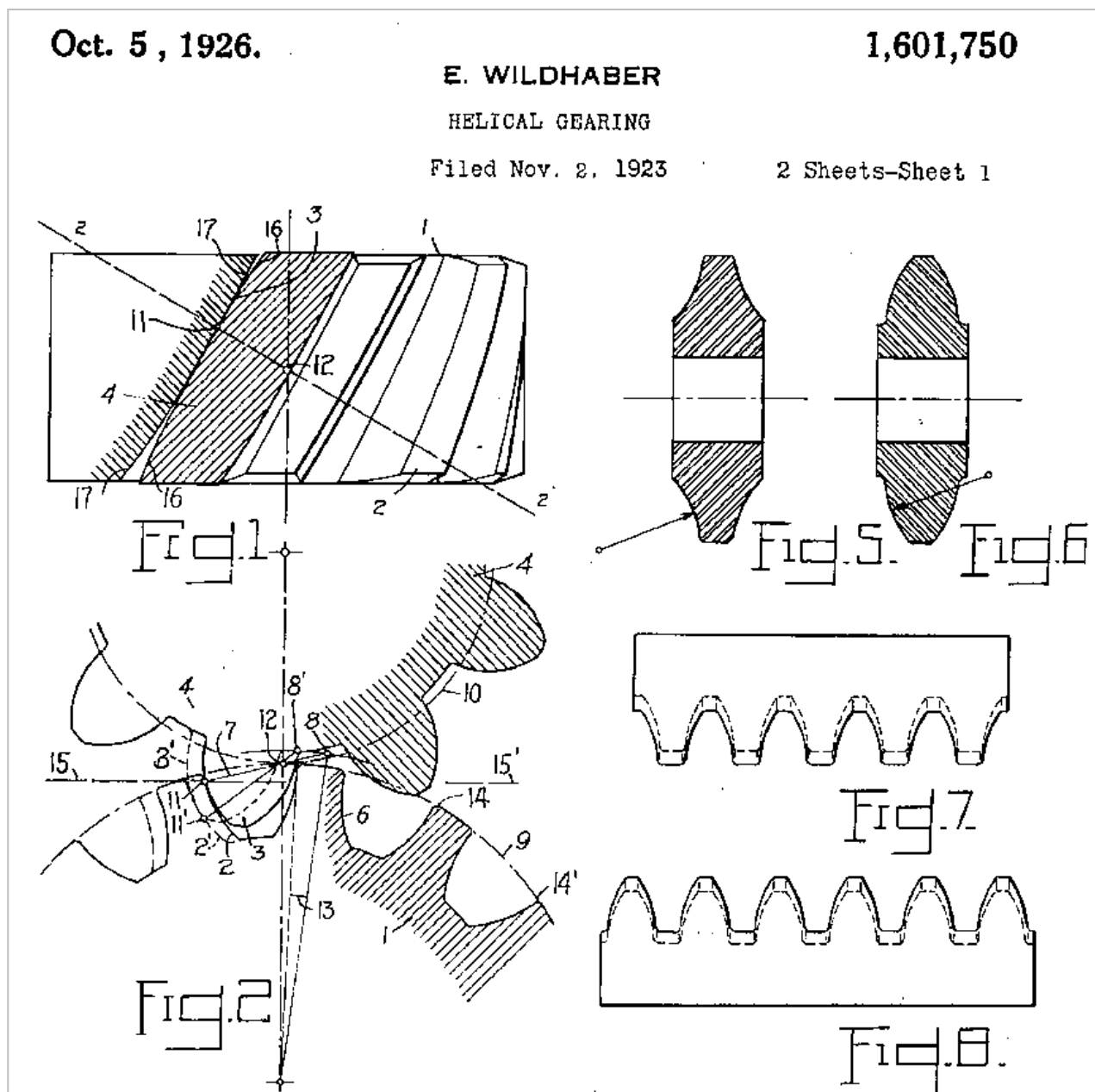


Рис. 4. Иллюстрации из [4], поясняющие концепцию зубчатой передачи Вильдгабера.

Принципиальные отличия зацепления Новикова от зубчатой передачи Вильдгабера.

Обсуждение этого вопроса следует начать с того, что поначалу сведения о зацеплении Новикова не публиковались. Длительное время сведения об этом зацеплении можно было получить только из источника [1]. Серьезные недостатки, допущенные при составлении описания изобретения [1], привели к совершенно неправильному пониманию сущности зацепления Новикова на Западе. В подавляющей большинстве случаев акцент, к сожалению, ошибочно делается на том, что профили зубьев круговые (а это не является принципиальным), тогда как принципиальные отличия ($m_p = 0$, $m_t = m_F > 1$) ушли на второй план. В конечном итоге это сослужило плохую службу в отношении приоритета

зацепления *Новикова*. В этой связи достаточно одного, но показательного примера. В работе [6] *Dyson et al* достаточно детально анализируют как *зацепление Новикова*, так и *зубчатую передачу Вильдгабера*. При этом авторы ([6] *Dyson et al*) ссылаются на а.с. СССР №109750⁶, не имеющее никакого отношения к изобретению *Новикова* (*очень* распространенная ошибка в западной литературе, относящейся к *зацеплению Новикова*). Это однозначно свидетельствует о том, что длительное время как *Dyson et al*, так и большинству специалистов на Западе оригинальные работы *М.Л. Новикова* доступны не были и они были вынуждены пользоваться вторичными источниками информации, корректность которых, как оказалось, сомнительна.

Неоднократные попытки разобраться в том, чем схожи и чем отличаются одна от другой *зубчатая передача Новикова* и *зубчатая передача Вильдгабера* в литературе известны. Ближе к пониманию этого вопроса подошел *N. Chironis* [5]. Но принципиальное отличие одной передачи от другой он не раскрыл⁷.

Здесь уместно вернуться к перечисленным выше характерным особенностям *зацепления Новикова*.

Поскольку точка контакта перемещается по профилю зубьев колеса и шестерни, следовательно торцовая составляющая коэффициента перекрытия m_p в зубчатой передаче *Э. Вильдгабера* в обязательном порядке отлична от нуля ($m_p > 0$). Из сказанного однозначно следует вывод, что существование зубчатой передачи, у которой торцовая составляющая коэффициента перекрытия m_p (как в *зацеплении Новикова*) в обязательном порядке равна нулю ($m_p = 0$) и в то же время (как в *зубчатой передаче Вильдгабера*) не равна нулю ($m_p > 0$) невозможно физически. Поэтому объединение изобретения *М.Л. Новикова* с изобретением *Э. Вильдгабера* абсурдно изначально – нельзя объединять необъединяемое (не может существовать зубчатая передача удовлетворяющая условиям $m_p = 0$ и $m_p > 0$ одновременно)!! Отсюда следует, что термин “*Wildhaber-Novikov gearing*” также как и термин “*W-N gearing*” некорректен, более того, этот термин абсурден.

Отличие *зацепления Новикова* от *зубчатой передачи Вильдгабера* хорошо прослеживается с позиций последних достижений в теории зубчатых зацеплений [15]: *зубчатая передача Новикова* удовлетворяет всем трем основным законам теории зубчатых зацеплений, тогда как *зубчатая передача Вильдгабера* этим законам не удовлетворяет, что хорошо иллюстрируется на рис. 5.

В *зацеплении Новикова* вектор единичной нормали, \mathbf{n}_g , всегда направлен вдоль *мгновенной линии действия* (иными словами, вдоль *мгновенной линии зацепления*), LA_{inst} , как показано на рис. 5,а. В этом случае профиль зуба колеса, G , правильно расположен по отношению к

⁶ А.с. №109750 (СССР), *Распылитель воды*./П.Ф. Писулин, Заявлено 2 января 1957, Кл. 36d 1, 28b, 801.

⁷ Любопытный факт, на с. 135 в работе [5] *N. Chironis* приводит такую реакцию *Э. Вильдгабера* на обсуждение сходства и различий между зубчатой передачей *Вильдгабера* и *зацеплением Новикова*: “According to Ernest Wildhaber, who received the U.S. patent in 1926 on a circular tooth form, “All the characteristics of the Novikov gearing are completely anticipated by my patent. My gearing never had a real test here, although a pair of gears was made in the 1920’s. It would be wrong to dismiss the Russian development as old and known”” [“По словам Эрнеста Вильдгабера, получившего в 1926 году патент США на зубья круглой формы, “все характеристики зубчатой передачи Новикова полностью предусмотрены моим патентом. Моя передача здесь никогда не подвергалась настоящим испытаниям, хотя пара шестерен была изготовлена в 1920-х годах. Было бы неправильно отвергать российские разработки как старые и известные””].

“граничной N –окружности” радиуса r_N (иными словами, к “граничной окружности Новикова” радиуса r_N).

В отличие от зацепления Новикова, в зубчатой передаче Вильдгабера, направление вектора единичной нормали, \mathbf{n}_g , не совпадает с направлением мгновенной линии действия, LA_{inst} , как показано на рис. 5,b. В этом случае профиль зуба колеса, G , неправильно расположен по отношению к “граничной N –окружности” радиуса r_N .

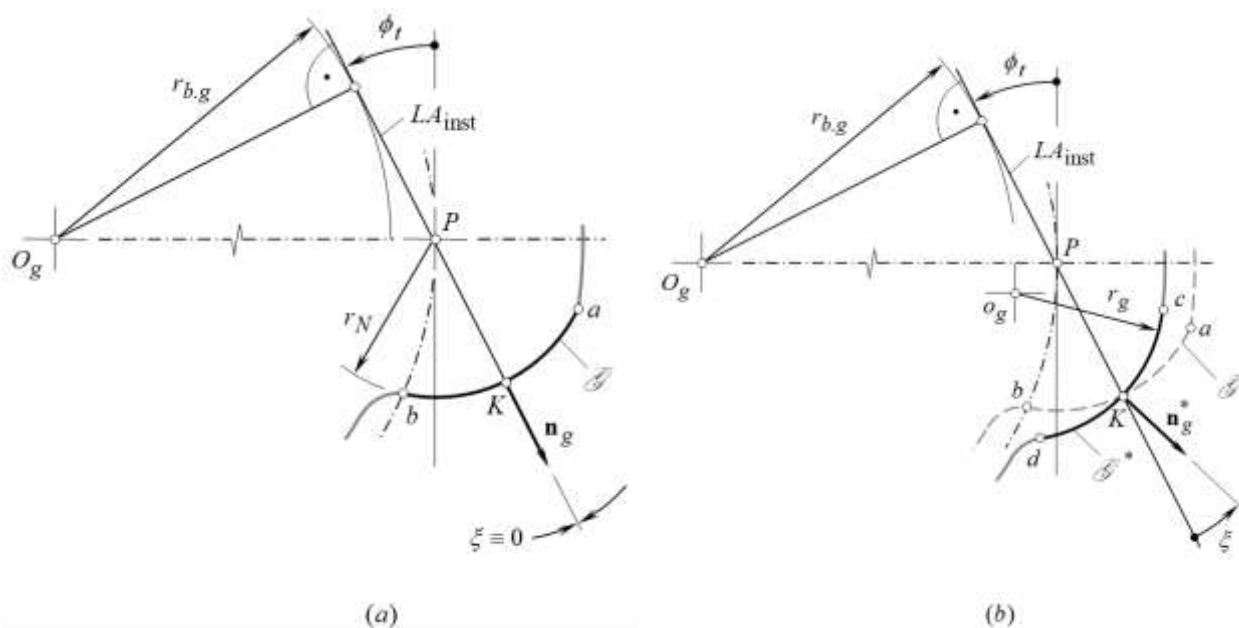


Рис. 5. Правильное (а) расположение кругового профиля зуба колеса G в зацеплении Новикова (единичный вектор нормали \mathbf{n}_g к поверхности зуба колеса направлен вдоль мгновенной линии действия LA_{inst}) и неправильное (b) G^* в зубчатой передаче Вильдгабера (единичный вектор нормали \mathbf{n}_g к поверхности зуба колеса отклонен от мгновенной линии действия LA_{inst}).

Вероятные причины появления термина “Wildhaber-Novikov gearing”. Выявление причин, приведших к тому, что зацепление Новикова на Западе называют “Wildhaber-Novikov gearing” или “W-N gearing”, может оказаться полезным для утверждения приоритета *М.Л. Новикова* на разработанный им новый вид зубчатых зацеплений.

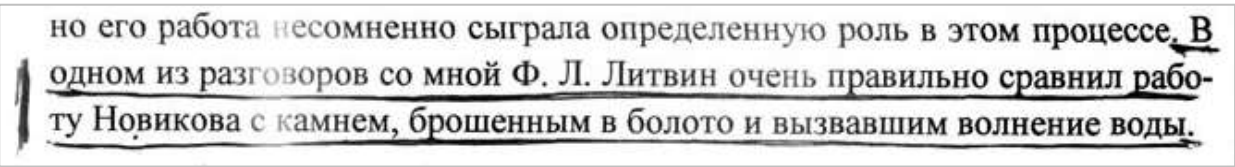
Новый вид зубчатых зацеплений был разработан *М.Л. Новиковым*, когда он проходил службу в Военно-Воздушной инженерной академии им. Н.Е. Жуковского. ВВИА им. Н.Е. Жуковского является режимным заведением. Понятно, что диссертация, выполненная в режимном заведении, не могла быть доступной широкому кругу специалистов в СССР. Атмосфера секретности вокруг этого изобретения усиливалась в связи с рассмотрением вопроса о возможном патентовании изобретения *М.Л. Новикова* за рубежом.

Для широкого круга специалистов за пределами СССР опубликованные труды *М.Л. Новикова*: (а) его диссертация [1], (b) описания изобретения к авторскому

свидетельству [2] и (с) монография [3] были практически недоступны. Научные контакты между специалистами СССР и Запада были крайне ограничены. Западные специалисты не имели возможности получить достоверную информацию о *зацеплении Новикова* из первых рук. Поэтому на Западе передачи с *зацеплением Новикова* воспроизводились по отрывочным и неполным сведениям. В подавляющем большинстве случаев акцент, к сожалению, был сделан на том, что профили зубьев круговые (а это не является принципиальным), тогда как принципиальные отличия ($m_p = 0$, $m_t = m_F > 1$) ушли на второй план.

Неполное/неправильное понимание кинематики и геометрии *зацепления Новикова* привело к некорректному сравнению этого вида зацепления с *зубчатой передачей Вильдгабера*. Неправильные выводы, сделанные из такого сравнения, послужили *первой причиной* того, что на Западе в обиход вошел некорректный термин “W-N gearing”. Таким образом, избыточный режим “секретности” вокруг *зацепления Новикова* сыграл злую шутку с этим неоспоримым достижением *М.Л. Новикова*.

Приоритет *М.Л. Новикова* широко пропагандировался в СССР. Так, уже 13-16 ноября 1957 года Институтом машиноведения АН СССР совместно с ВВИА им. Н.Е.Жуковского была проведена Всесоюзная научно-техническая конференция “Опыт внедрения в промышленность зубчатых передач с *зацеплением Новикова*”. В ознаменование большого вклада *М.Л. Новикова* в развитие нового вида зубчатых передач, конференция постановила присвоить новым передачам имя их автора и впредь именовать их “*Зубчатые передачи с зацеплением Новикова*” или сокращенно “*Зубчатые передачи Новикова*” [3]. Об этом знали все мало-мальски связанные с зубчатыми передачами специалисты. Вместе с тем, позиция ученых и специалистов как в СССР, так и в современной России по отношению к *зацеплению Новикова* во многих случаях была и остается далекой от такой, какой она должна была-бы быть. Приведем достаточно показательный пример.



но его работа несомненно сыграла определенную роль в этом процессе. **В**
одном из разговоров со мной Ф. Л. Литвин очень правильно сравнил рабо-
ту Новикова с камнем, брошенным в болото и вызвавшим волнение воды.

Рис. 6. Фрагмент из “*Воспоминаний*” Я.С. Давыдова [7].

Скептическое (если не глубоко пренебрежительное) отношение к *зацеплению Новикова* приведено в *Воспоминаниях* [7]. Свою позицию по этому вопросу автор *Воспоминаний* подытоживает такой репликой: “... В одном из разговоров со мной Ф.Л. Литвин очень правильно сравнил работу Новикова с камнем, брошенным в болото и вызвавшим волнение воды.” (см. рис. 6). Если научное достижение *М.Л. Новикова* сравнивается с “камнем”, следовало-бы пояснить что следует подразумевать под “болотом”? Об этом автор *Воспоминаний* умалчивает.

Другой пример, на стр. 46 в журнале⁸ “Редукторы и приводы” опубликовано письмо проф. Ф.Л. Литвина⁹, в котором, в частности, приведено крайне упрощенное истолкование

⁸ №5 (07), 2006.

⁹ Это письмо проф. Ф.Л. Литвина предваряется комментарием главного редактора журнала гр-на В.И. Парубца. Вот заслуживающий внимания фрагмент из этого письма: “... в связи с весьма почтенным возрастом этого выдающегося ученого и его проживанием далеко за пределами нашей страны привлечение проф. Ф.Л. Литвина к участию в данной дискуссии затруднительно. Поэтому

сущности зацепления Новикова: “Смысл идеи Новикова состоит в том, что он предложил **цилиндрические передачи** с точечным зацеплением, т.е. с локализованным рабочим контактом поверхностей ...”, и далее “Я не согласен, что Новиков перевернул теорию зацеплений”. Как указывал М.Л. Новиков [2], зубчатые передачи с новым видом зацепления могут быть выполнены “с **параллельными, пересекающимися и перекрещивающимися** осями, с внешним и внутренним зацеплением, с постоянным и переменным передаточным числом, ...”. Значит-ли это, что Ф.Л. Литвин не знаком с работами [1], [2] и [3]?

С какой целью Ф.Л. Литвин искажает сущность изобретения М.Л. Новикова, а его научный результат ограничивается только цилиндрическими передачами? Либо Ф.Л. Литвин не понимал идею зацепления Новикова, либо он сознательно искажал концепцию зацепления Новикова – иного просто не дано. Здесь есть над чем серьезно задуматься.

Нет оснований сомневаться в том, что придерживаясь такой позиции ни автор *Воспоминаний*, ни автор письма в журнале “Редукторы и приводы” не станут отстаивать приоритет зацепления Новикова. Поэтому неудивительно, что в известных книгах Ф.Л. Литвина (1960, 1968) [8] зацепление Новикова правильно называется зацеплением Новикова, а вот в изданных позже книгах (1994, 2004) [9], [10] это же зацепление уже называется “*Wildhaber-Novikov gearing*”. Литвин Ф.Л. не счел нужным воспользоваться удобным случаем и просветить западных специалистов, убедительно показав им принципиальную разницу между зацеплением Новикова и зубчатой передачей Вильдгабера. Это что, сказался недостаток профессионализма или на то есть другие причины?

Можно привести множество примеров незаслуженно пренебрежительного отношения со стороны некоторых из специалистов к разработанному М.Л. Новиковым новому виду зубчатых зацеплений.

Поэтому неадекватная позиция ученых и специалистов как в СССР так и в современной России в утверждении приоритета М.Л. Новикова в разработке нового вида зубчатых зацеплений следует рассматривать как **вторую причину** того, что на Западе в обиход вошел некорректный термин “*W-N gearing*”.

Автор данной статьи был в полном смысле обескуражен, узнав что даже в настоящее время далеко не все исследователи зацепления Новикова знакомы с изобретением Вильдгабера. Эта неосведомленность встречается даже среди специалистов, посвятивших десятилетия своего труда исследованию зубчатых передач Новикова. Иными словами, наряду с недостаточной информированностью зарубежных исследователей о зацеплении Новикова широко распространена симметричная необознанность советских/российских специалистов с изобретением Э. Вильдгабера [4]. Поэтому недостаточная информированность об

Редакция решила воспользоваться любезно предоставленным в наше распоряжение С.А. Лагутиным фрагментом его переписки с проф. Ф.Л. Литвиным по электронной почте, который мы публикуем в нашем переводе с английского”.

Читая комментарий гр-на В.И. Парубца, автор данной статьи попытался представить себе как один русскоговорящий (Ф.Л. Литвин) не без напряжения (все-таки английский не его родной язык) пишет письмо на английском языке другому русскоговорящему (С.А. Лагутину), тот (плохо владея языком) пыхтит от усердия читая письмо первого, после чего третий русскоговорящий (В.И. Парубец – похоже вообще не владеющий английским), получив копию письма от второго, скрепя от напряжения переводит это письмо обратно на русский язык. Занятная картина получается, не так-ли? Это один из множества образчиков клоунады, на уровне которой до настоящего времени рассматривается изобретение М.Л. Новикова (не помогла даже присужденная М.Л. Новикову Ленинская премия !! – каким умом это понять?!).

изобретении Э. Вильдгабера является *третьей причиной* встречающихся двусмысленностей в толковании приоритета М.Л. Новикова.

Этот перечень причин может быть продолжен.

Автор придерживается позиции, что изобретенное М.Л. Новиковым зубчатое зацепление по значимости сопоставимо с изобретенным Л. Эйлером эвольвентным зацеплением. Эйлер Л. решил задачу для случая прямозубой передачи ($m_F = 0$), когда коэффициент торцового перекрытия m_p в зубчатой передаче больше единицы, $m_p > 1$, (это техническое решение впоследствии было развито в область косозубых колес). Новиков М.Л. решил подобную задачу для случая, когда коэффициент торцового перекрытия m_p в косозубой передаче равен нулю, $m_p = 0$, а условие пересопряжения зубьев выполняется за счет осевого перекрытия зубьев, коэффициент которого больше единицы ($m_F > 1$). Здесь позволю себе каламбур: “*Давайте воздадим Эйлеру – Эйлерово, Новикову – Новиково, а Вильдгаберу – Вильдгаберово*”.

Перспективы развития. Передачи Новикова далеко не исчерпали свои потенциальные возможности. Они имеют большой резерв по увеличению плотности мощности, передаваемой зубчатой передачей.

Передачи Новикова представляют собой пример *т.н. конформных зубчатых передач*. К конформным зубчатым передачам относят зубчатые передачи с малой разницей радиусов кривизны профилей зубьев в точке контакта: чем меньше эта разность, тем выше степень конформности рабочих поверхностей зубьев передачи. Так, степень конформности профилей зубьев внутренней эвольвентной зубчатой передачи выше (при прочих одинаковых условиях), чем передачи с наружным зацеплением. Интересующиеся могут обратиться к [11] и [12], где вопросы конформности контактирующих поверхностей рассмотрены подробно (см. гл. 4 в каждом из источников).

Увеличение степени конформности рабочих поверхностей зубьев колес позволяет увеличить плотности мощности передаваемой зубчатой передачей.

Разработанная М.Л. Новиковым система зацепления позволяет проектировать зубчатые передачи, выпуклые поверхности зубьев шестерни которых контактируют с вогнутыми поверхностями зубьев колеса. Разность радиусов кривизны взаимодействующих профилей назначается исходя из того, чтобы “абсорбировать” погрешности изготовления, погрешности монтажа/сборки и упругие деформации всей зубчатой передачи (с учетом упругих деформаций корпуса, валов, зубчатых полюсов и пр.) под нагрузкой. В такой постановке полученное М.Л. Новиковым решение задачи увеличения плотности мощности, передаваемой передачей, следует рассматривать как *необходимое*, но не *достаточное*.

Изучая материалы по *передачам Новикова*, опубликованные за последние 20-25 лет, нельзя было не обратить внимание на недопустимо упрощенное представление о важности геометрии контакта поверхностей зубьев и ее влиянии на выходные параметры работы зубчатой передачи. Серьезным, если не самым главным упущением при исследовании *передач Новикова* было игнорирование геометрии контакта боковых поверхностей зубьев колеса и шестерни. Переход от контакта выпуклых поверхностей зубьев колес к контакту выпуклой и вогнутой поверхностей сам по себе является только необходимым, но не достаточным условием увеличения несущей способности рабочих поверхностей зубьев колес.

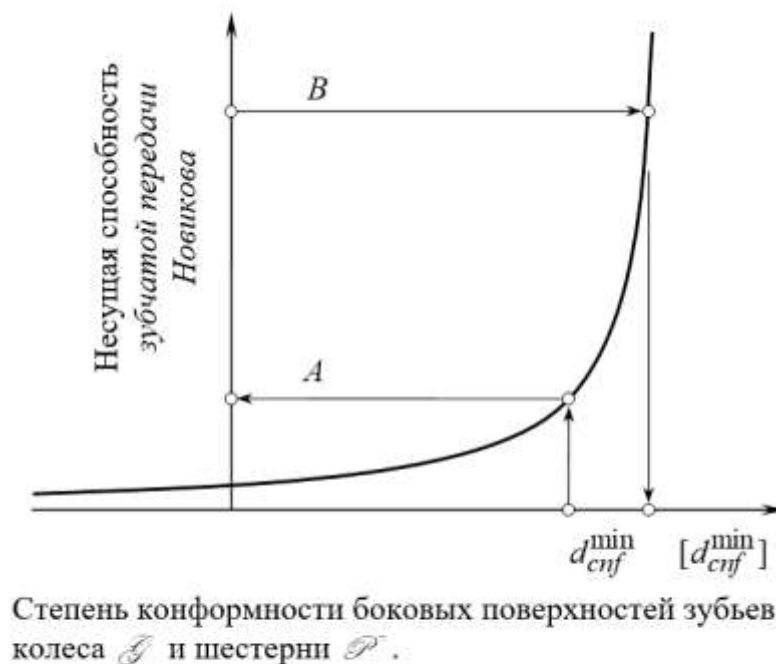


Рис. 7. Зависимость несущей способности зубчатой передачи Новикова от степени конформности боковых поверхностей зубьев колеса G и P

Важно при этом обеспечить еще некоторую минимально необходимую степень конформности контактирующих поверхностей зубьев, начиная с которой эффект увеличения несущей способности начинает проявляться (см. рис. 7). Для “мягких” колес это недостаток нивелировался быстрой приработкой зубьев и их самоадаптацией к условиям эксплуатации. Для высокотвердых колес приработка не спасает положение. Закаленные колеса изначально должны (а) иметь требуемую форму и (б) правильное взаимное расположение под нагрузкой. В литературе нет ответа на вопрос что же из себя представляет “*требуемая форма*”. Ответ на этот вопрос может быть получен на основании результатов, изложенных в [11], [12] и др.

Еще в 2006 году я поделился с *В.И. Короткиным* (г. Ростов-на-Дону) своими соображениями и некоторыми результатами исследований по этому вопросу¹⁰. Речь шла о концептуальной сущности зацепления Новикова, точнее – передач Новикова с использованием высокотвердых (например, цементованных и шлифованных) колес, т.е. когда приработка колес практически исключена: “*Главная причина неудач с передачами такого типа – недостаточное понимание того, что происходит в очень локальной области контакта поверхностей зубьев колес. Для меня является странным, почему сразу занялись разработкой профилей зубьев колес, не разобравшись досконально с физикой происходящего в зоне контакта поверхностей зубьев. Контакт – это принципиально!*”

Требуемые профили зубьев колес являются следствием требуемой локальной геометрии контактирующих поверхностей, но никак не наоборот. Геометрия контакта поверхностей зубьев колес – ключ к решению принципиальных вопросов, связанных с работоспособностью

¹⁰ См.: <http://www.reduktor-news.ru/forum/index.php?fid=1&id=11564943501613&page=0>, сообщение №3 от 11 ноября 2006, где выложены выдержки из моего письма *В.И. Короткину* (г. Ростов-на-Дону).

передач Новикова”. И далее, следующие концептуальные задачи могут быть решены аналитически:

“(а) Для заданных условий работы передачи могут быть рассчитаны допуски, выдержав которые можно гарантированно получить работоспособную передачу;

(б) По точности имеющегося зубообрабатывающего станка и инструмента можно ответить на вопрос, можно ли на данном станке и заданным инструментом обработать колеса для гарантированно работоспособной передачи;

(с) При известной жесткости ..., т.е. всего того, чем определяется результирующее смещение одного колеса по отношению к другому колесу под нагрузкой, ответить на вопрос, можно-ли в этих условия применять передачи Новикова в принципе”.

Следует констатировать, что далеко не все из того, что производилось промышленностью под названием “зубчатые передачи Новикова” являлось (и является по настоящее время) таковым. Под флагом “зубчатые передачи Новикова” зачастую производилось нечто, отдаленно напоминающее зацепление Новикова, но при близком рассмотрении таковым не являющееся. Иными словами, многое из того, что безуспешно пытались внедрить в промышленность, по сути к зацеплению Новикова имело (и имеет) отдаленное отношение. **ВСЕ** зубчатые колеса для передач Новикова, нарезанные в условиях обката (т.е., нарезанные червячными фрезами, долбяками и т.п.) зубчатыми колесами Новикова не являются (колеса для зубчатых передач Новикова не могут быть нарезаны/начисто обработаны в условиях обката). А отсюда можно сделать вывод об отрапортованных успехах и неудачах промышленного использования передач зацеплением Новикова.

Безусловно, сделанное М.Л. Новиковым заслуживает быть исследованным обстоятельно. По результатам такого исследования может быть написана монография. В распоряжении автора этой статьи был очень ограниченный материал как о М.Л. Новикове, так и о Э. Вильдгабере.

Выводы

Приведены краткие сведения биографического характера о М.И. Новикове и о Э. Вильдгабере.

Кратко рассмотрены особенности зубчатых передач Новикова в сравнении с цилиндрической зубчатой передачей, предложенной Э. Вильдгабером. Показана принципиальная разница зубчатых передач этих двух типов. Для такого сравнения использованы последние достижения в теории зубчатых зацеплений. Проанализированы возможные причины появления некорректного термина “зубчатые передачи Вильдгабера-Новикова”. Убедительно показано, что М.Л. Новиков является единственным автором нового вида зубчатых зацеплений, а название “зубчатые передачи Новикова” является единственно правильным название для изобретенного зубчатого зацепления. Показаны возможные пути развития зубчатых передач Новикова.

Список литературы

- [1] Новиков М.Л. *Основные вопросы геометрической теории точечного зацепления, предназначенного для зубчатых передач большой мощности*, (Докторская диссертация). - М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1955.
- [2] Новиков М.Л. *Зубчатые передачи, а также кулачковые механизмы с точечной системой зацепления*. А.с. №109113, кл. 47, 6. Заявл. 19.04.1956. Бюл. изобретений №10, 1957.
- [3] Новиков М.Л., *Зубчатые передачи с новым зацеплением*. – М: Изд. ВВИА им. Н.Е.Жуковского, 1958. –186 с.
- [4] Pat. No. 1.601.750 (USA), *Helical Gearing*./Ernest Wildhaber, filed: November 2, 1923.

- [5] Chironis, N., “New Tooth Shape taking Over? Design of Novikov Gears”, pp.124-135 in: *Gear Design and Application*, Edited by Nicholas Chironis, McGraw-Hill Book Company, New York, 1967, 374p.
- [6] Dyson, A., Evans, H.P., and Snidle, R.W., “Wildhaber-Novikov Circular Arc Gears: Geometry and Kinematics”, *Proc. R. Soc., London, A* 403, 1986, P. 313-340.
- [7] Давыдов Я.С., *Воспоминания*, (рукопись), март 1991. [см. форум на сайте журнала “Редукторы и приводы”: <http://www.reduktor-news.ru/forum/index.php?fid=1&id=11564943501613>].
- [8] Литвин Ф.Л., *Теория зубчатых зацеплений*. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Наука, 1968. – 584с. (Изд. 1-е – М.: Наука, 1960).
- [9] Litvin, F.L., *Gear Geometry and Applied Theory*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1994, 724p.
- [10] Litvin, F.L., Fuentes, A., *Gear Geometry and Applied Theory*, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2004, 800p.
- [12] Радзевич С.П., *Формообразование поверхностей деталей. Основы теории*. Монография. – Киев: Растан, 2001. –592с.
- [13] Radzevich, S.P., *Generation of Surfaces: Kinematic Geometry of Surface Machining*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2014, 738 pages. [1st edition: Radzevich, S.P., *Kinematic Geometry of Surface Machining*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2008, 508p].
- [14] Radzevich, S.P., *High-Conformal Gearing: Kinematics and Geometry*, 2nd edition, Elsevier, Amsterdam, 2020, 506 pages. [1st edition: Radzevich, S.P., *High-Conformal Gearing: Kinematics and Geometry*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2015, 332 pages].
- [15] Radzevich, S.P., *Theory of Gearing: Kinematics, Geometry, and Synthesis*, 2nd Edition, revised and expanded, CRC Press, Boca Raton, FL, 2018, 934 pages. [1st edition: Radzevich, S.P., *Theory of Gearing: Kinematics, Geometry, and Synthesis*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2012, 743 pages].

Библиография

- Radzevich, S.P., “A Possible Way of Evolution of *Novikov* Gearing”, in: Proceedings of the IX International Conference “*Complex Assurance of Quality of Technological Processes & Systems*”, May 14-16, 2019, Chernihiv (Ukraine), Vol. 1, 2019, P.39-40.
- Radzevich, S.P., “An Examination of High-Conformal Gearing”, *Gear Solutions*, February, 2018, P. 31-39.
- Radzevich, S.P., “High-Conformal Gearing: A new look at the concept of *Novikov* gearing”, In: *Proceedings of International Conference on Gears 2015*, October 5–7, 2015, Technical University of Munich (TUM), Garching (near Munich), Germany, 2015, P. 457-470.
- Radzevich, S.P., “High-Conforming Gearing: Kinematics and Geometry”, in: *International Gear Conference 2014*, Conference proceedings, Vol. II, Lyon Villeurbanne, France, 26 – 28 August, 2014, P. 846-857.
- Radzevich, S.P., *High-Conformal Gearing: Kinematics and Geometry*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2015, 332 p.
- https://www.amazon.com/High-Conformal-Gearing-Kinematics-Stephen-Radzevich-ebook/dp/B016MD4KLI/ref=sr_1_6?dchild=1&keywords=radzevich+stephen+p&qid=1605119111&s=books&sr=1-6
- Radzevich, S.P., *High-Conformal Gearing: Kinematics and Geometry*, 2nd edition, Elsevier, Amsterdam, 2020, 506 pages. https://www.amazon.com/-/es/Stephen-Radzevich/dp/0128212241?language=en_US

Дата поступления: 27 ноября 2020 г.

УДК 534.323 : 66.069.83

О ВОЗБУЖДЕНИИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННОЙ ДОБРОТНОСТЬЮ

Сергей Константинович Цветаев

Москва, Россия

stsvetaev@mail.ru

Аннотация. Описывается способ возбуждения электромеханических колебаний стержневых колебательных систем пьезоэлектрическим преобразователем, при котором раскачка производится на резонансной частоте, а поддержание колебаний на частоте антирезонанса. Это позволяет избежать недопустимых амплитуд без нагрузки и обеспечить устойчивый запуск под нагрузкой.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, электромеханические аналогии, резонансная и антирезонансная частоты, механическая добротность.

ABOUT EXCITATION OF PIEZOELECTRIC OSCILLATORY SYSTEMS WITH VARIABLE ABSORPTION OF SOUND

Sergey Tsvetaev

Moscow, Russia

stsvetaev@mail.ru

Abstract The way of excitation of electromechanical fluctuations, is described, in which the fluctuation begins on resonant frequency, and proceeds on antiresonant frequency. It allows to avoid inadmissible amplitudes without loading and to achieve fast excitation of fluctuations at loading.

Key words: the piezoelectric converter, electromechanical analogies, resonant and antiresonant frequency, mechanical absorption of sound.

Резонансные настройки колебательных систем с пьезокерамическим возбуждением механических колебаний описаны в ряде монографий и статей [1-4]. Применяются частотные, амплитудные, фазовые и многомерные способы управления режимами возбуждения колебаний. Всегда используются расчёты эквивалентных схем с питанием от генератора в виде источника напряжения на основе электромеханических аналогий [5]. Сравнительно недавно в работе [6] предложено переместить пьезоэлементы из пучности напряжений с целью исключить их разрушение. Цель настоящей работы тоже ограничить механические напряжения в режимах колебаний, близких к холостому ходу. Предлагается использовать эффективные источники тока различной мощности, выпускаемые, например, фирмой APC, аббревиатура названия которой совпадает с аббревиатурой American Piezo Ceramics.

В настоящей работе предлагается возбуждение колебаний от генератора напряжения и поддержание колебаний от генератора тока. Это оправдано, например, когда необходимо ограничить амплитуду в не нагруженном состоянии, чтобы избежать превышения усталостной прочности в узлах стоячих волн. Такое возможно в стержневых колебательных системах ультразвуковой сварки, резки, распылителях из слоя и в пьезотрансформаторах, для которых характерны то нагруженное, то не нагруженное состояние [7-9]. При переходе из одного состояния в другое изменяется механическая добротность колебательной системы, и для предотвращения значительных амплитуд необходимо регулировать подводимую электрическую мощность. Например, если волновая колебательная система [7] (Рис.7) колеблется с частотой 70 кГц и амплитуда его торца 5 мкм, а его экспоненциально-ступенчатый концентратор изготовлен из сплава Д-16Т, то через 30 минут в основании тонкой части концентратора прорастает трещина из-за недостаточной усталостной прочности металла. Такая амплитуда возможна без механической нагрузки при питании от генератора напряжения, когда механическая добротность равна 1000. Когда колебательная система (Рис.7) заторможена висящей на торце каплей жидкости [10], её механическая добротность равна 10, и для раскочки и распыления капли требуется более значительная энергия, чем для поддержания колебаний.

Чтобы быстро возбудить механические колебания из положения покоя при минимальной подаваемой мощности, нужно с резонансной частотой приложить к колебательной системе силу, которая при раскочке должна превысить силу трения покоя и будет совпадать по фазе с колебательной скоростью. Может оказаться, что для преодоления трения покоя эта сила должна быть больше, чем требуется в дальнейшем для поддержания колебаний с заданной амплитудой. Поэтому можно уменьшить силу после достижения нужной амплитуды или, например, приложить её в противофазе со смещением. При этом сила опережает колебательную скорость по фазе почти на $\pi/2$. Как правило, можно установить величину силы для поддержания нужной амплитуды и тем самым предотвратить механические повреждения.

Можно показать, что при использовании пьезоэлектрического преобразователя раскочка в этом случае происходит на резонансной частоте, а поддержание колебаний возможно на антирезонансной частоте. Для этого можно воспользоваться эквивалентной электрической схемой преобразователя с элементами C_0 , L , R и C вблизи резонанса [5]. Механические аналоги иллюстрируются пружинным маятником, который приводится для иллюстрации фаз силы и колебательной скорости. Как известно из электромеханических аналогий, сила F эквивалентна электрическому напряжению E на пьезоэлементе, колебательная скорость V эквивалентна току в цепи LRC, смещение x эквивалентно заряду Q , протекающему в цепи LRC. C_0 – собственная ёмкость пьезоэлементов, L и C определяются массой и упругой податливостью (гибкостью) колебательной системы, R определяется потерями энергии (в том числе и полезными) при работе преобразователя. Совместно L , R и C определяют механическую добротность колебательной системы.

При резонансе ток I в основном идёт через цепь RLC, и он имеет ту же фазу, что и приложенное напряжение E . То есть V и F также имеют одинаковую фазу. На рис.1 они изображены векторами в момент максимума в положении равновесия маятника. Знаками + и – показаны знаки напряжений в какой-то момент времени. При резонансе знаки E и L (слева направо) совпадают и не совпадают одинаковое время.

При антирезонансе ток I в основном идёт через C_0 и он опережает по фазе напряжение E на $\pi/2$. Ток в цепи LRC в противофазе с током через C_0 , и он отстаёт по фазе от напряжения E на $\pi/2$. Это означает, что сила F опережает колебательную скорость V на $\pi/2$, её максимум

при максимальном смещении x , и она приложена к витку пружины выше груза и направлена в сторону, куда в ближайший момент времени будет направлена колебательная скорость. При антирезонансе знаки E и L совпадают по времени чаще, так как указано на рисунке.

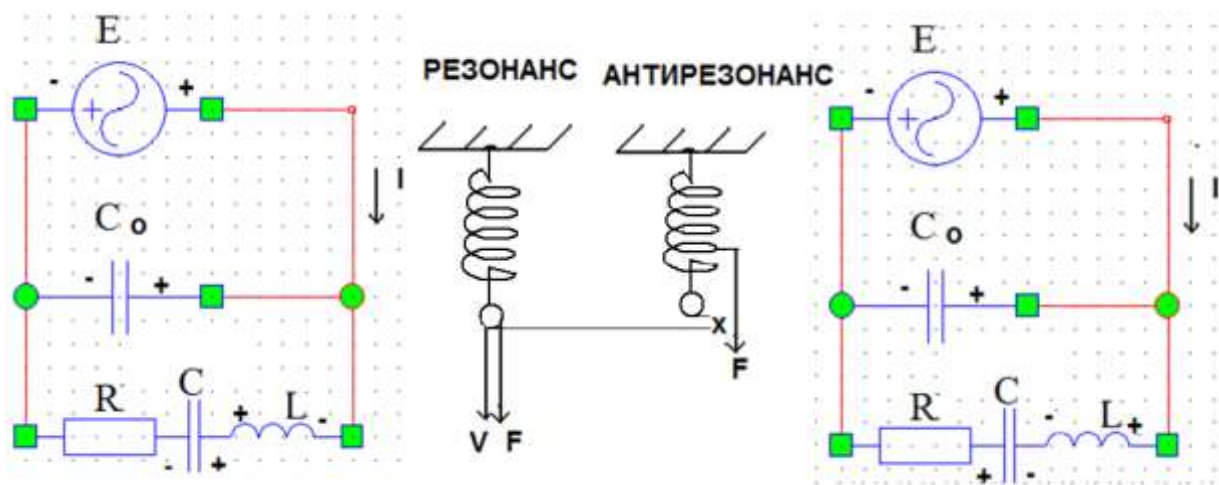


Рис.1. Эквивалентная электрическая схема пьезопреобразователя и механическая иллюстрация при резонансе и антирезонансе

Чтобы при антирезонансе ограничить максимальную амплитуду x , которая по электромеханической аналогии эквивалентна проходящему в цепи LRC заряду Q , нужно ограничить заряд, вносимый током I . Вносимый за период колебаний T заряд $\Delta Q \approx I \cdot T$, где T – период колебаний. Следовательно, для стабилизации амплитуды генератор должен быть источником заданного тока.

Для примера на рис.2 приведены реальные векторные диаграммы (не в масштабе) токов и напряжений такой электрической схемы с добротностью 200 при резонансе (слева) и при антирезонансе (справа). Эти диаграммы подтверждают предыдущие утверждения.

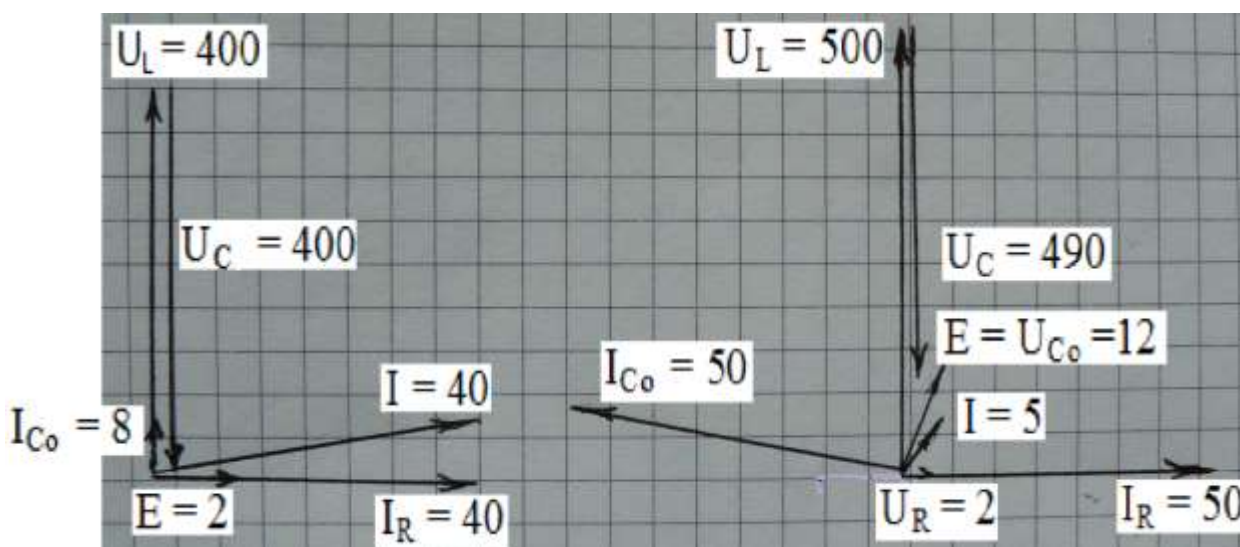


Рис.2. Векторные диаграммы токов и напряжений при резонансе (слева) и при антирезонансе (справа)

В реальной колебательной системе вблизи резонанса при механической добротности больше 10 элементы L и C изменяются на величину порядка 1% при изменении R в сотни раз, и добротности от 1000 до 10. Работа на антирезонансной частоте предполагает подачу на пьезоэлементы повышенного напряжения, что может вызвать большой их нагрев, если пьезоматериал имеет значительные диэлектрические потери.

Таким образом, требуется генератор (Рис.3), работающий на резонансной частоте до того момента, когда ток преобразователя достигнет заданного значения. В этот момент автоматическая подстройка частоты переключается на частоту антирезонанса, а питание генератора на источник тока. При этом напряжение на преобразователе возрастает, а его ток уменьшается. Так как при увеличении нагрузки напряжение источника тока увеличивается, а напряжение реального источника тока ограничено, то снова включаются питание от источника напряжения и обратная связь на резонансе. Для простоты на блок-схеме напряжение обратной связи снимается с небольших резисторов в цепях преобразователя и дополнительного конденсатора. Кроме стабилизации механической амплитуды колебаний схема позволяет отдельно настроить мощность на резонансе и на антирезонансе.



Рис.3. Блок-схема генератора

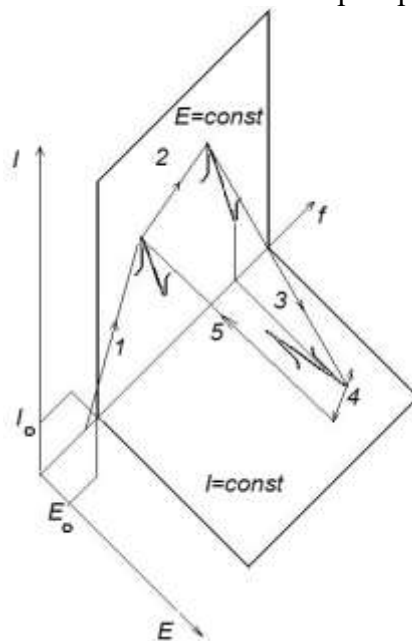


Рис.4. Стадии возбуждения колебательной системы

На рис.4 приведены стадии возбуждения колебательной системы в координатах ток I , напряжение E , частота f . Стадия 1 – включение, 2 – раскочка колебаний с одновременным повышением добротности, 3 – переход на антирезонансную частоту, 4 – поддержание постоянной амплитуды, 5 – при увеличении нагрузки (уменьшении добротности) переход в режим раскочка колебаний.

Существует удобная программа EMTLab, которая позволяет получать не только амплитудно-частотные характеристики схем, но и осциллограммы переходных процессов. На рис.5 приведена схема преобразователя с добротностью 200 и переходные процессы при его запуске от источника тока. Эквивалент преобразователя L2C1R1. Его колебательная скорость соответствует его току на осциллограмме V2. При питании преобразователя от источника напряжения амплитуда колебаний устанавливается быстрее. Видно, что при росте колебательной скорости (тока V2) напряжение V1 (то есть сила) снижается. На осциллограммах этой программы также можно наблюдать фазы токов и напряжений в разных точках схемы при переходных процессах.

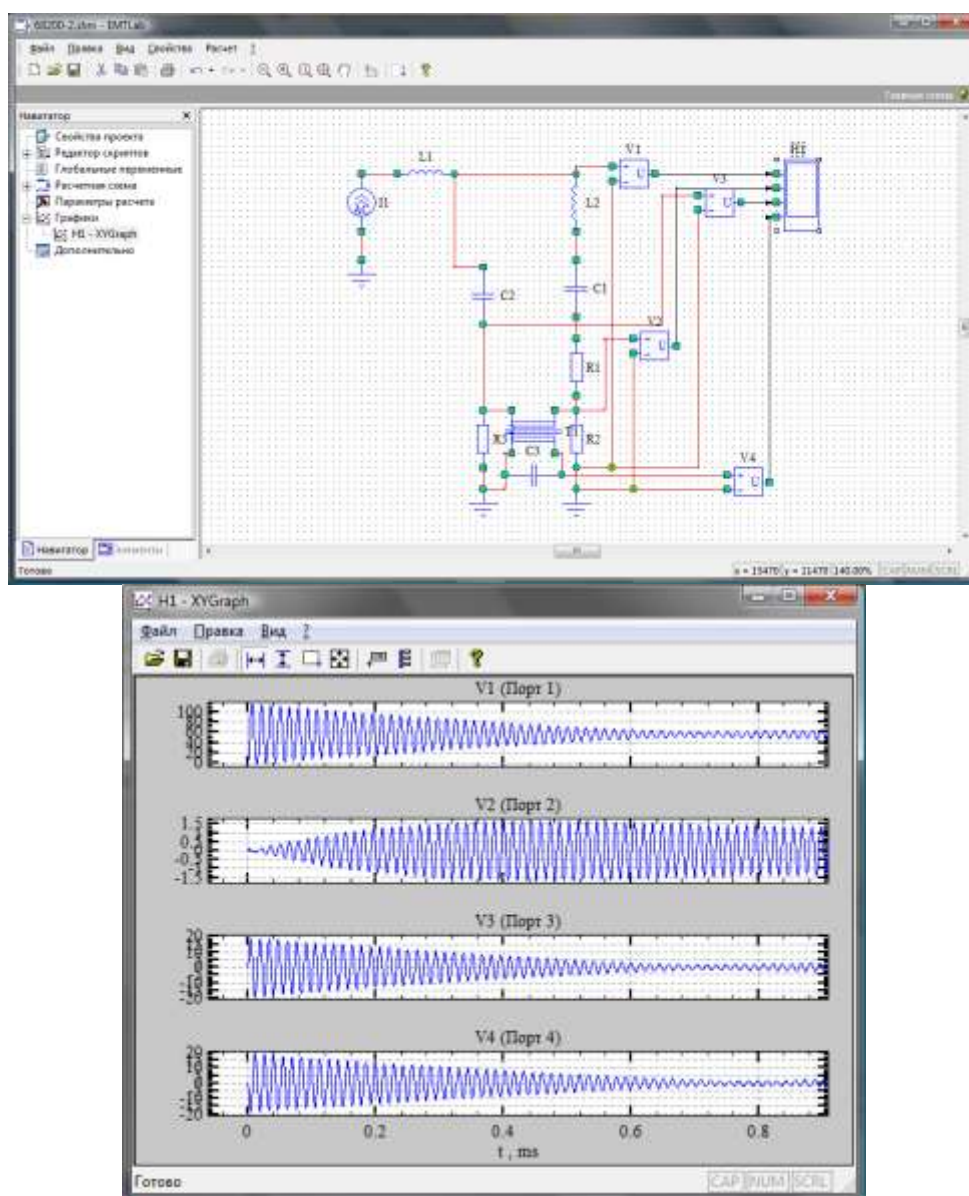


Рис.5. Схема преобразователя и её переходные процессы при запуске от источника тока

На рис.6 приведен пример схемы преобразователя с добротностью 20 и амплитудно-частотные характеристики цепи обратной связи для антирезонансной частоты (синяя кривая), для резонансной частоты (зеленая кривая), и их разность (красная кривая). Максимум красной кривой находится между частотами резонанса и антирезонанса. Этот сигнал часто используется для обратной связи в ультразвуковых мойках и при ультразвуковой сварке.

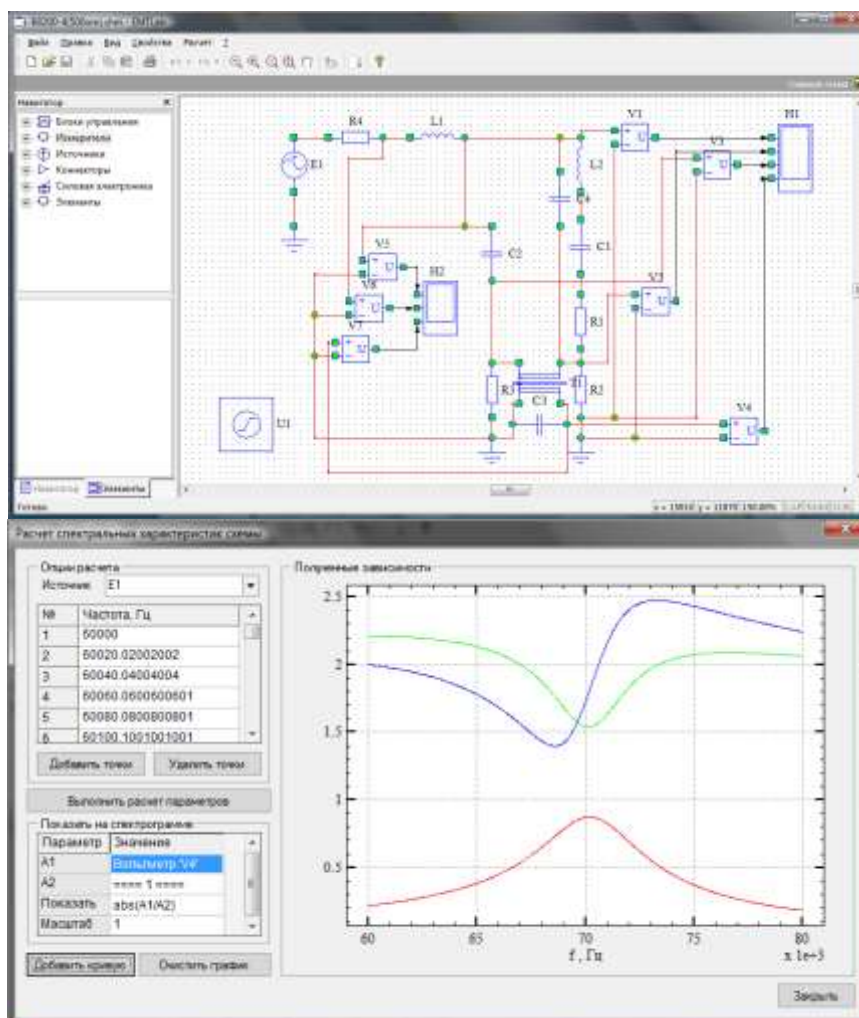


Рис.6. Схема преобразователя с добротностью 20 и амплитудно-частотные характеристики напряжений в её цепях

Указанные соображения и программа были применены для разработки генератора (Рис.8) ультразвукового распылителя [7] (Рис.7), имеющего следующие эквивалентные характеристики. $L = 24$ мГн, $C = 220$ пФ, $R = 20 - 500$ Ом, $C_0 = 8000$ пФ, резонансная частота без нагрузки 69,9 кГц, под нагрузкой 69,2 кГц, антирезонансная частота без нагрузки 70 кГц, под нагрузкой 69,5 кГц. Переключение с резонанса на антирезонанс и обратно производится транзистором в частотозадающей цепи микросхемы подключением и отключением ёмкости 220 пФ. Источник напряжения (слева) и источник тока (вверху) переключаются автоматически и отличаются сетевыми ёмкостями.

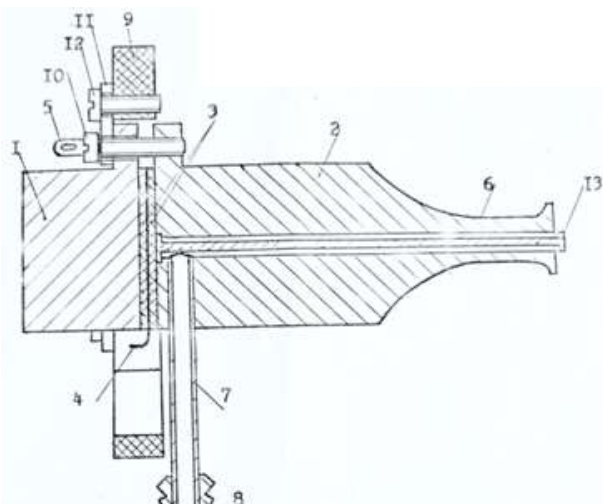


Рис.7. Ультразвуковой распылитель жидкости, 1, 2 – части волнового вибратора с экспоненциально-ступенчатым концентратором из титанового сплава ВТ-3, 3 – пьезоэлектрические диски диаметром 20 мм, толщиной 1 мм, 4 и 5 – контакты, 6 – внутренний канал для подачи жидкости, 7 – трубка с ниппелем 8, 9 – изолирующее кольцо, 10 и 12 – винты 6 штук, 11 – пластинка крепления 3 штуки, 13 – вставка с отражателем жидкости для повышения скорости распыления без образования крупных капель.

Работу распылителя с генератором можно наблюдать [10]. Видно, что колебания преобразователя устойчиво восстанавливаются после отключения и включения питания, а также после значительной нагрузки.

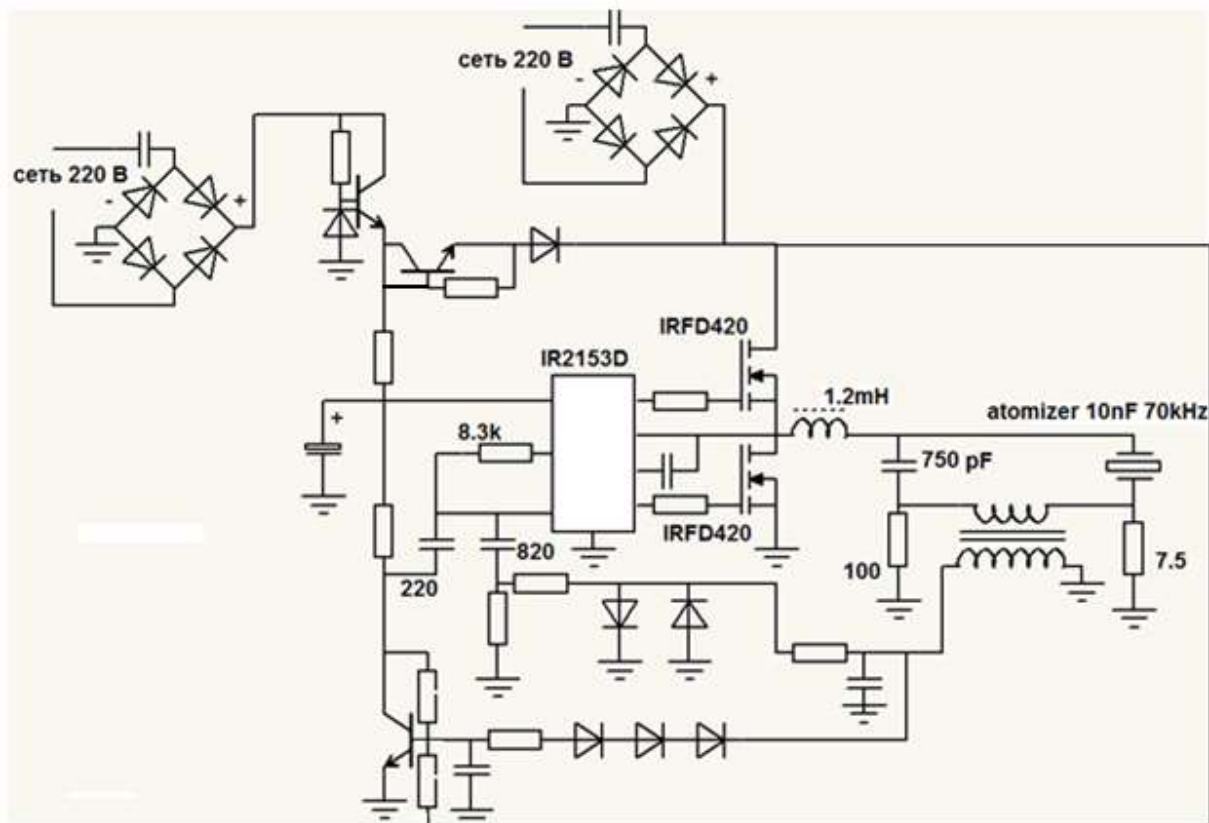


Рис.8. Электронная схема генератора.

Итак, указана удобная программа для моделирования эквивалентных схем и схем генераторов. Показана возможность ограничения амплитуды колебательной системы в режиме холостого хода при переходе на антирезонансную частоту и питание от источника тока. Приведена схема генератора и работа ультразвукового распылителя жидкости, имеющего соответствующие стадии возбуждения колебаний.

Список литературы

1. Е.Кикучи, Ультразвуковые преобразователи. - М.: Мир, 1972.
2. А.В.Донской, О.К.Келлер, Г.С.Кратыш, Ультразвуковые электротехнологические установки. - Л.: Энергоиздат, 1982.
3. А.А.Ерофеев, Г.А.Данов, В.Н.Фролов, Пьезокерамические трансформаторы и их применение в радиоэлектронике. - М.: Радио и связь, 1988.
4. Голямина И.П., Горячев А.В., Гуляев А.А., Мастеров А.Е., Пономарев Д.М., Славинский З.М. Исследование переходных процессов в ультразвуковых колебательных системах, применяемых для микросварки// Акустический журнал. - Т.30. - С. 32-38 (1984)
5. Маленькая энциклопедия УЛЬТРАЗВУК под ред. И.П.Голяминой. - М.: 1979.
6. В.К.Асташев, К.А.Пичугин Резонансные настройки ультразвуковой стержневой системы с пьезоэлектрическим возбуждением колебаний// Вестник научно-технического развития. - 2013. - №9 (73).
7. В.В.Скобельцын, С.К.Цветаев Ультразвуковое распылительное устройство// Акустический журнал. - 1977. - Т.23, №6. - С. 951.
8. Виноградов Г.В., Цветаев С.К. Пистолет ультразвуковой сварки// Сварочное производство. - 1984. - №7.
9. Виноградов Г.В., Цветаев С.К. Установка ультразвуковой сварки плоских проводников к контактными площадкам кремниевых пластин// Сварочное производство. - 1985. - №4.
10. <https://www.youtube.com/watch?v=Vh6ifYGE3to&feature=share>

Дата поступления: 7 декабря 2020 г.